

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開2001-274099

(P2001-274099A)

(43) 公開日 平成13年10月5日 (2001.10.5)

(51) Int.Cl.<sup>7</sup>

識別記号

F I

テーマコード(参考)

H 0 1 L 21/205

H 0 1 L 21/205

4 K 0 3 0

C 2 3 C 16/505

C 2 3 C 16/505

5 F 0 0 4

H 0 1 L 21/3065

H 0 5 H 1/46

M 5 F 0 4 5

H 0 5 H 1/46

H 0 1 L 21/302

B

審査請求 有 請求項の数22 O L (全 16 頁)

(21) 出願番号 特願2000-85281(P2000-85281)

(22) 出願日 平成12年3月24日 (2000.3.24)

(71) 出願人 000006208

三菱重工業株式会社

東京都千代田区丸の内二丁目5番1号

(72) 発明者 山越 英男

神奈川県横浜市金沢区幸浦一丁目8番地1

三菱重工業株式会社基盤技術研究所内

(72) 発明者 佐竹 宏次

神奈川県横浜市金沢区幸浦一丁目8番地1

三菱重工業株式会社基盤技術研究所内

(74) 代理人 100058479

弁理士 鈴江 武彦 (外5名)

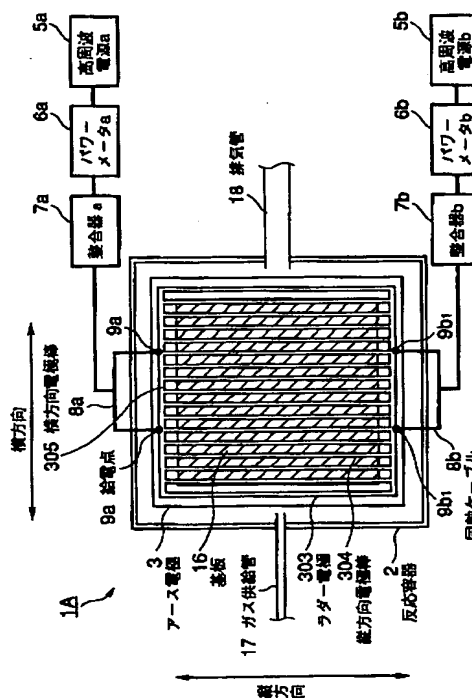
最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 放電電極への給電方法、高周波プラズマ発生方法および半導体製造方法

(57) 【要約】

【課題】 高周波 (VHF) を利用するプラズマ CVD 等において、大きな基板等を対象として、大面積で均一なプラズマを生成させ、均一処理を行うことができる放電電極への給電方法、高周波プラズマ生成装置および半導体薄膜製造方法を提供する。

【解決手段】 放電電極に給電された高周波電力に基づいて放電状態を発生させるための放電電極への給電方法であって、異なる発振周波数の高周波を互いに独立する高周波電源を用いて、それぞれの電源の周波数の差により定在波の発生を抑制する。



## 【特許請求の範囲】

【請求項1】 放電電極に給電された高周波電力に基づいて放電状態を発生させるための放電電極への給電方法であって、異なる発振周波数の高周波を互いに独立する高周波電源を用いて供給し、それぞれの電源の周波数の差により定在波の発生を抑制することを特徴とする放電電極への給電方法。

【請求項2】 請求項1記載の方法において、各高周波電源間の周波数の差を、各高周波電源の発振周波数の20%以内とすることを特徴とする放電電極への給電方法。

【請求項3】 請求項1又は2記載の方法において、各高周波電源の周波数を、一台の発振器により制御することを特徴とする放電電極への給電方法。

【請求項4】 給電された高周波電力に基づいて放電状態を発生させるための給電方法であって、2つまたはそれ以上の高周波電源で、かつ、それぞれの周波数が異なる、もしくは、それぞれの位相差の時間変化が異なる高周波電源を用い、1つの放電容器内の1つまたはそれ以上の放電電極に接続する給電方法において、放電電極への複数の給電点を互に対称な位置に配置することを特徴とする放電電極への給電方法。

【請求項5】 給電された高周波電力に基づいて放電状態を発生させるための給電方法であって、2つまたはそれ以上の高周波電源を用い、かつ、それぞれの周波数が異なる、もしくは、それぞれの位相差の時間変化が異なる高周波電源を用い、1つの放電容器内の1つまたはそれ以上の放電電極に接続する給電方法において、負荷電極と高周波電源のインピーダンス整合を行う整合器と、当該高周波電源の間に、アイソレータを設置し、当該高周波電源への他の高周波電源からの入射高周波電力を削減し、当該電源を保護することを特徴とする放電電極への給電方法。

【請求項6】 請求項5記載の方法において、各高周波電源の周波数の差が、周波数の平均の4%以内、好ましくは1%以内であることを特徴とする給電方法。

【請求項7】 給電された高周波電力に基づいて放電状態を発生させるための給電方法であって、2つまたはそれ以上の高周波電源を用い、1つの放電容器内の1つまたはそれ以上の放電電極に接続する給電方法において、各高周波電源に放電電極側から入射する高周波電力の大きさにより、当該高周波電源以外の高周波電源の出力を制限し、当該高周波電源への他の高周波電源からの入射高周波電力を削減し、当該高周波電源を保護することを特徴とする放電電極への給電方法。

【請求項8】 給電された高周波電力に基づいて放電状態を発生させるための給電方法であって、2つまたはそれ以上の高周波電源を用い、かつ、それぞれの周波数が異なる、もしくは、それぞれの位相差の時間変化が異なる高周波電源を用い、1つの放電容器内の1つまたはそ

れ以上の放電電極に接続する給電方法において、複数の高周波電源からの高周波電力を高周波ミキサーにより結合し、放電電極に給電することを特徴とする放電電極への給電方法。

【請求項9】 給電された高周波電力に基づいて放電状態を発生させるための放電電極への給電方法であって、当該高周波電力の電圧振幅を時間的に変化させる、すなわち、AM変調することにより、当該放電電極内に生じる電圧分布を変化させることを特徴とする放電電極への給電方法。

【請求項10】 請求項1乃至9のうち何れか1記載の給電方法において、周波数の差の逆数である周期、または、AM変調周波数の逆数である周期を、当該放電電極で発生させるプラズマ中の活性原子もしくは活性分子もしくはイオンの消滅寿命より短く、好ましくは1/2以下とすることを特徴とする放電電極への給電方法。

【請求項11】 請求項1乃至9のうち何れか1記載の給電方法において、周波数の差の逆数である周期、または、AM変調周波数の逆数である周期を、下式から計算されるSiH<sub>3</sub>活性分子の寿命 $\tau$ ：

$$\tau \approx (\Delta x)^2 / (2D)$$

ここに、Dは拡散係数で $D = 2.5 \times 10^3$  (cm<sup>2</sup>/秒)、 $\Delta x$ は電極から基板までの距離 (cm) または二水素原子ラジカルの寿命 $1.1 \times 10^{-4}$ 秒の、どちらか一方、もしくは、両方より短く、好ましくは1/2以下とすることを特徴とする放電電極への給電方法。

【請求項12】 請求項1乃至9のうち何れか1記載の給電方法において、周波数の差の逆数である周期、または、AM変調周波数の逆数である周期を、当該放電電極で発生させるプラズマ中の活性原子もしくは活性分子もしくはイオンの発生寿命より長く、かつ、10倍以下、好ましくは2倍以上4倍以下とすることを特徴とする放電電極への給電方法。

【請求項13】 請求項1乃至9のうち何れか1記載の給電方法において、周波数の差の逆数である周期、またはAM変調周波数の逆数である周期を、1秒以下、好ましくは1ミリ秒以下とすることを特徴とする放電電極への給電方法。

【請求項14】 請求項1乃至9のうち何れか1記載の給電方法において、周波数の差の逆数である周期、またはAM変調周波数の逆数である周期を、下式から計算される原料ガスの放電領域滞在時間 $t$ よりも長く、好ましくは2倍以上とすることを特徴とする放電電極への給電方法。

$$t \approx (S \cdot \Delta x) / Q$$

ただし、Sは基板面積 (cm<sup>2</sup>)

$\Delta x$ は放電電極から基板までの距離 (cm)

Qは体積流量 (cm<sup>3</sup>/秒)

【請求項15】 請求項1乃至14項のうち何れか1記載の給電方法において、放電電極がラダー型電極または

網目状電極であることを特徴とする放電電極への給電方法。

【請求項16】 請求項1乃至14項のうち何れか1記載の給電方法において、放電電極が平行平板型電極であることを特徴とする放電電極への給電方法。

【請求項17】 請求項1乃至16項のうち何れか1記載の給電方法において、放電電極のうち、基板を設置する電極と、基板を設置しない電極のそれぞれに、2台またはそれ以上の高周波電源から高周波電力を供給することを特徴とする放電電極への給電方法。

【請求項18】 請求項1乃至17のうち何れか1記載の給電方法によってプラズマを発生させることを特徴とするプラズマ発生方法。

【請求項19】 請求項18記載のプラズマ発生方法によって、製膜、エッチング、もしくは表面処理の分布均一化を図ることを特徴とする半導体製造方法または表面処理方法。

【請求項20】 請求項1乃至17項に記載の給電方法によってプラズマを空間的および時間的に移動させることにより、プラズマ内の活性分子の発生を高効率化することを特徴とするプラズマ発生方法。

【請求項21】 請求項18記載のプラズマ発生方法によって、製膜、エッチング、もしくは表面処理の高速化を図ることを特徴とする半導体製造方法または表面処理方法。

【請求項22】 請求項1乃至21項のいずれかに記載の給電方法、プラズマ発生方法、または、半導体製造方法において、使用する全ての高周波の周波数が10～800MHzの範囲にあることを特徴とする給電方法、プラズマ発生方法、半導体製造方法、または表面処理方法。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、太陽電池や薄膜トランジスタなどに用いられるアモルファスシリコン、微結晶シリコン、多結晶薄膜シリコン、窒化シリコンなどの半導体の製膜や、半導体膜のエッチングに用いられる高周波プラズマ発生装置の放電電極への給電方法、および、これを用いたプラズマ発生方法および半導体製造方法に関する。また、放電を用いた各種の表面処理にも用いることができる。

【0002】

【従来の技術】上記高周波プラズマ発生装置の構成とそれを用いた半導体の製造方法の例として、アモルファスシリコン半導体薄膜（以下、a-Siという）をプラズマ化学蒸着装置（以下PCVD装置という）にて製造する場合について、①平行平板型電極を用いた場合と、②ラダー電極を用いた場合の2つの場合の代表例を挙げて説明する。

【0003】図8はa-Si製膜にごく一般に用いられ

る①の平行平板型電極を用いた装置の一構成例を示している。反応容器1内に基板ヒータ2を設置し、電気的に接地する。基板ヒータ2と対向した位置に、基板ヒータ2からたとえば20mm離して平板電極3を設置する。平板電極3には外部の高周波電源4をインピーダンス整合器5および同軸ケーブル6を介して接続する。平板電極3には基板ヒータ2と対向する面と反対側に不要なプラズマが生成しないようにアースシールド8を設置する。

10 【0004】a-Si製膜は以下の手順で行う。まず、たとえば200℃に設定した基板ヒータ2上にa-Si薄膜を製膜する基板16を設置する。ガス供給管17からSiH<sub>4</sub>ガスをたとえば流速50sccmで導入し、真空排気管18に接続した図示しない真空ポンプ系の排気速度を調整することで反応容器1内の圧力をたとえば100mTorrに調節する。高周波電力を供給し、基板16と平板電極3の間にプラズマを発生させる。高周波電力が効率良くプラズマ発生部に供給されるようにインピーダンス整合器5を調整する。プラズマ19中ではSiH<sub>4</sub>が分解し、基板16表面にa-Si膜が製膜される。たとえば10分間程度この状態で製膜を行うことにより必要な厚さのa-Si膜が製膜される。

20 【0005】図9は②のラダー電極303を用いた装置の一構成例を示している。ラダー電極についてはたとえば特開平4-236781号公報に詳細が報告されている。図10はラダー電極303の構造がよく分かるように図9のA方向から描いた図である。また、ラダー電極を発展させた電極形状として、ラダー電極のように複数の電極棒を平行に並べた電極群を2つ直行させて配置させた網目状の電極がたとえば特開平11-111622号公報に報告されているが、これもラダー電極の一種と考えられ、同様に用いることができる。

30 【0006】反応容器1内に基板ヒータ2（図10には図示していない）を設置し、電気的に接地する。基板ヒータ2と対向した位置に、基板ヒータ2からたとえば20mm離してラダー電極303を設置する。ラダー電極303には外部の高周波電源4をインピーダンス整合器5および同軸ケーブル6を介して接続する。ラダー電極303には基板ヒータ2と対向する面と反対側に不要なプラズマが生成しないようにアースシールド308を設置する。

40 【0007】a-Si製膜は以下の手順で行う。まず、たとえば200℃に設定した基板ヒータ2上にa-Si膜を製膜する基板16を設置する。ガス供給管17からSiH<sub>4</sub>ガスをたとえば流速50sccmで導入し、真空排気管18に接続した図示しない真空ポンプ系の排気速度を調整することで反応容器1内の圧力をたとえば100mTorrに調節する。高周波電力を供給し、基板16とラダー電極303の間にプラズマを発生させる。高周波電力が効率良くプラズマ319発生部に供給され

るようにインピーダンス整合器5を調整する。プラズマ319中ではSiH<sub>4</sub>が分解し、基板16にa-Si膜が製膜される。たとえば10分程度この状態で製膜を行うことにより必重な厚さのa-Si膜が製膜される。

【0008】本構成例は図8の構成例と比較して、以下の2点の特徴がある。第一の特徴は、電極として平板電極を用いず、円形断面の電極棒を梯子型に組んだラダー型と呼ばれる電極を用いていることである。本電極は電極棒の間を原料のSiH<sub>4</sub>ガスが自由に流れるので、原料供給が均一に行われるという特徴を持つ。第二の特徴は、給電を電極の1箇所に行うのではなく、複数（ここでは4点）箇所にしていることである。

【0009】

【発明が解決しようとする課題】現在、上記技術を用いて作製される太陽電池用薄膜半導体、フラットパネルディスプレイ用薄膜トランジスタなどは、高速製膜による低コスト化、および、低欠陥密度、高結晶化率などの高品質化が求められている。これら要求を満たす新しいプラズマ生成方法として、高周波電源の高高周波化（30～800MHz）がある。高周波化により製膜速度の高速化と高品質化が両立されることが、たとえば文献Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. 424, pp.9, 1997に記されている。とくに、a-Siに代る新しい薄膜として注目されている微結晶Si薄膜の高速高品質製膜にこの高周波が適していることが最近分かってきている。

【0010】ところが、この高周波による製膜は、均一大面積製膜が難しいという欠点がある。これは、高周波の波長が電極サイズと同程度のオーダーであることから、電極端などで生じる反射波を主因とする電極上定在波の発生、浮遊インダクタンスの存在による電圧分布への影響、プラズマと高周波との相互干渉などでプラズマが不均一となり、結果、製膜が不均一になるためである。

【0011】①平行平板電極を用いた場合の代表例として挙げた上記構成例において、電極サイズが30cm×30cmを越え、または、周波数が30MHzを越えると、上記定在波の影響が顕著となり、半導体製膜上最低限必要な製膜膜厚均一性±10%の達成が困難になる。

【0012】図11は、100MHzでの定在波による電圧分布の1例である。図11には同時にイオン飽和電流分布も示している。イオン飽和電流分布は、電子密度分布にほぼ等しく、計測が簡単であるので、一般にプラズマ分布の指標として用いられる。電圧分布を見ると電極上に定在波が生じており、それに対応してイオン飽和電流分布すなわちプラズマ分布が不均一になっていることが分かる。

【0013】一方、②ラダー電極を用いた場合の代表例としてあげた図9、図10は、ラダー電極を用いていることに加え、1点給電では顕著に生じてしまう定在波を、4点に給電することにより低減したことを特徴とす

るものである。しかしながら、この場合でも、電極サイズが30cmを越え、または、周波数が80MHzを越えると均一な製膜の実現が難しくなってくる。

【0014】図12に60MHzおよび100MHzで4点給電したときのラダー電極上に生じる電圧分布を示す。60MHzでは比較的均一な電圧分布を示しているが、100MHzでは不均一になってしまっている。また、4点の給電点位置は、試行錯誤的に最適位置を見つける必要があり、非常に手間暇がかかる。さらに、ガス圧、高周波電力などの製膜条件を変更すると、最適位置が変ってしまうという問題がある。

【0015】以上のような問題は学会でも注目され、これまでに例えば文献Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. 377, pp.27, 1995に記されているように、平行平板の給電側と反対側にロスのないリアクタンス（コイル）を接続することが提案されている。これは、定在波の電極端からの反射条件を変えることで、定在波の波形の中で分布が比較的平らな部分、たとえば正弦波の極大付近を電極上に発生させて、電極に生じる電圧分布を少なくするものである。しかしながら、この方法は定在波を根本から無くすのではなく、正弦波のうち平らな部分が電極上に発生するようにするだけであるため、均一部分が得られるのは波長の1/8程度までであり、それを越える範囲の均一化は原理的に不可能である。図13に100MHzで平行平板の一端をロスのないリアクタンス（コイル）で終端したときの電圧分布を示す。このように、終端端から30cm程度は均一であるが、それ以上は不均一になってしまっており、この部分は製膜に用いることができない。

【0016】以上のように、高周波を用いたプラズマ発生において、従来の技術では、1m×1mを越えるような非常に大きな基板を対象として、大面積で均一なプラズマを発生し、均一処理を行うことはできなかった。

【0017】なお、本発明の類似技術として、2つのこととなる高周波を2つの放電電極にそれぞれ供給する技術があり、たとえば、M. Noisan, J. Pelletier, ed., "Microwave Excited Plasmas", Technology, 4, second impression, pp.401, Elsevier Science B.V. 1999に詳述されている。

【0018】しかし、この技術の目的は、1つの高周波をプラズマ生成のために、他方の高周波を絶縁性の基板の表面バイアス電圧の制御のために用い、基板への活性イオン等の流入量および入射エネルギーを制御することであり、本発明の1m×1mを越えるような非常に大きな基板を対象として、大面積で均一なプラズマを発生し、均一処理を行う目的とは全く異なるものである。

【0019】本発明は上記課題を解決するためになされたものであって、高周波（VHF）を利用するプラズマCVDにおいて、大きな基板を対象として、大面積で均一なプラズマを生成させ、均一処理を行うことができ

る放電電極への給電方法、高周波プラズマ生成装置および半導体薄膜製造方法を提供することを目的とする。

【0020】

【課題を解決するための手段】前記課題を解決する高周波放電電極の発明の第1は、こうした事情を考慮し、電極上に生じる定在波の発生を原理的に無くし、電圧分布を均一にすることによって、 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ を越える非常に大きなサイズの基板に対しても均一な製膜をすべく考案されたものである。

【0021】高周波でのプラズマ密度の不均一発生原因としては、上記のように、電極上定在波の発生、浮遊インダクタンスの存在による電圧分布への影響、プラズマと高周波との相互干渉などが考えられてきたが、発明者らはこれを鋭意検討した結果、発明が解決しようとする課題に記したように、電極上の定在波発生が主因であることを見いだした。そこで、定在波の発生を原理的に無くす手段として、電極に2つの周波数を供給してビートを生じさせることを考えた。

【0022】以下に、わかりやすくするため簡単化して\*

$$\phi = \phi_1 + \phi_2 = \cos(\omega_1 t - k_1 z) + \cos(\omega_2 t + k_2 z) = 2 \cos(\omega_{ave} t - k_{odd} z) \cos(\omega_{odd} t - k_{eve} z) \dots (4)$$

ただし、

$$\omega_{ave} = \omega_1 + \omega_2 / 2, \quad \omega_{odd} = \omega_1 - \omega_2 / 2,$$

$$k_{ave} = k_1 + k_2 / 2, \quad k_{odd} = k_1 - k_2 / 2$$

まず、 $\omega_1 = \omega_2$ の場合、すなわち、両端から同じ周波数の高周波を供給した場合を考える。これは、たとえば単一の電源から高周波電力を2つに分配して供給した場合 ※

$$\phi = 2 \cos(\omega_1 t) \cos(-\omega_1 / v_1 \cdot z) \dots (5)$$

上式(5)から、角周波数 $\omega_1$ のキャリア波 $\cos(\omega_1 t)$ と、包絡線 $\cos(-\omega_1 / v_1 \cdot z)$ からなる定在波が生じてしまうことが分かる。

★

$$\phi = 2 \cos(\omega_{ave} t - k_{odd} z) \cos(\omega_{odd} t - k_{eve} z) \dots (6)$$

上式(6)から、角周波数 $\omega_{ave}$ のキャリア波 $\cos(\omega_{ave} t - k_{odd} z)$ と、一般的に「ビート」もしくは「うなり」と呼ばれる角周波数 $\omega_{odd}$ の変調波 $\cos(\omega_{odd} t - k_{eve} z)$ となり、変調波は空間的に移動し、定在波となることがない。

【0030】本発明はこの原理に基づき、2つまたはそれ以上の異なる周波数の高周波を電極に供給することにより、高周波を用いて高速高品質製膜を得ながら、例えば $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ を越えるような非常に大きな基板サイズを対象とした装置でも、電極での定在波の発生を抑え、均一なプラズマおよび均一な処理を可能とする放電電極への給電方法を提供するものである。

【0031】また、本発明の第二は、2つまたはそれ以上の電源から高周波を電極に供給するために必要な電源保護の方法を提供するものである。

【0032】また、本発明の第三は、プラズマ発生の周期を、そのプラズマ処理に必要なプラズマ中の活性分子

\*説明する。すなわち、1次元に簡単化し、2つの周波数を1本の電極の両端から供給する場合を考え、さらに、それぞれの高周波の波の減衰が無視でき、かつ、それぞれの振幅が1で位相定数が等しく、かつ、電極端での反射が小さく無視できるとすれば、両端から供給される高周波の波はそれぞれ下式(1)及び(2)で与えられる。

$$\phi_1 = \cos(\omega_1 t - k_1 z) \dots (1)$$

$$\phi_2 = \cos(\omega_2 t + k_2 z) \dots (2)$$

ここで、 $\omega$ はそれぞれの波の角周波数( $\text{rad/s}$ )、 $k$ は波数( $\text{rad/m}$ )、 $t$ は時間( $\text{s}$ )、 $z$ は位置( $\text{m}$ )である。

【0024】波数 $k$ は、位相速度 $v$ ( $\text{m/s}$ )および角周波数 $\omega$ を用いて次式(3)のように表される。

$$\phi_1 = \omega_1 / v_1, \quad k_2 = \omega_2 / v_2 \dots (3)$$

電極上の電圧分布 $\phi$ は、これらの波の和、すなわち下式(4)で表される。

【0026】

※合、もしくは、単一の発振器からの高周波で複数の高周波電源を同期させて運転しその出力を供給した場合に相当する。この場合、電圧分布 $\phi$ は下式(5)で表される。

【0027】

★【0028】一方、周波数の違う $\omega_1 \neq \omega_2$ の場合には、下式(6)で電圧分布 $\phi$ が求められる。

★

【0029】

などが効率よく発生する周期にすることにより、処理効率を向上させる方法を提供するものである。

【0033】また、本発明の第四は、プラズマ発生の周期をパーティクルの発生の抑制、またはパーティクルの放電領域からの排出に効果的な周期とすることにより、パーティクルの低減、膜質の向上、膜圧分布を均一化する方法を提供するものである。

【0034】以下、各請求項ごとに詳細を説明する。

【0035】前記課題を解決する請求項1の高周波放電電極への給電方法の発明は、2つの周波数( $\omega_1 \neq \omega_2$ )を電極に供給する具体的な手段として、2台の独立した高周波電源を用いることより効果を得ることを狙ったものである。通常、たとえば60MHzの電源を2台用意した場合、それぞれに内蔵されている発振器の精度のため、数百kHz程度の周波数の違いがあるのが普通である。したがって、この違いにより $\omega_1 \neq \omega_2$ が自動的に成り立ち、定在波の発生が抑制でき、非常に簡単なシステ

ムで課題の解決が図れる。

【0036】請求項2は、各高周波電源間の周波数の差を余り大きくして、片方の周波数が最適な周波数から大きくずれてしまうと、製膜やエッチングの性能が、最適な周波数の性能から著しく低下してしまうので、これを防止するため、周波数の差を20%以内としたものである。

【0037】請求項3は、全くの独立した電源では、周波数の差が安定せず、再現性に問題が生じることがあるので、これを一定値に制御することにより、再現性を確保することを目的としたものである。

【0038】請求項4は、複数電源を用いて定在波を抑制するにあたり、前記の1次元的なモデル化が当てはまる必要があるが、1つの具体的条件として放電電極への複数の給電点を互いに対称な位置に配置することを特徴としたものである。

【0039】請求項5は、複数電源を用いて定在波を抑制するにあたり、当該電源に他の電源から周波数および位相の違う高周波が入射し、当該電源が損傷を受けることを防止することを目的とし、負荷電極と高周波電源のインピーダンス整合を行う整合器と、当該高周波電源の間に、アイソレータを設置し、当該高周波電源への他の高周波電源からの入射高周波電力を削減し、当該電源を保護することを特徴とするものである。

【0040】請求項6は、請求項5において、実際に容易に製作できるアイソレータの周波数帯域幅が、高周波電力1kW以下において4%程度であり、高周波電力2kW程度において1%程度であることから、この範囲内のシステム構築を考え、各高周波電源の周波数の差を周波数の平均の4%以内、好ましくは1%以内であることを特徴とするものである。

【0041】請求項7は、複数電源を用いて定在波を抑制するにあたり、当該電源に他の電源から周波数および位相の違う高周波が入射し、当該電源が損傷を受けることを防止することを目的とし、各高周波電源に放電電極側から入射する高周波電力の大きさにより、当該高周波電源以外の高周波電源の出力を制限し、当該高周波電源への他の高周波電源からの入射高周波電力を削減し、当該高周波電源を保護することを特徴とするものである。請求項8は複数電源を用いて定在波を抑制するにあたり、1つの給電点から複数の周波数の高周波を供給することにより、別々の給電点から供給する場合と比べて安価にシステムを構築することを目的として、複数の高周波電源からの高周波電力を高周波ミキサにより結合し、放電電極に給電することを特徴とするものである。

【0042】請求項9は、定在波を抑制する手段として2つの周波数を用いるのとは別の手段として、高周波電力の電圧振幅を時間的に変化させる、すなわち、AM変調することにより、当該放電電極内に生じる電圧分布を変化させることを特徴とするものである。

【0043】請求項10は請求項1～9のいずれか1項に記載の給電方法において、周期が遅いとプラズマがON/OFFを繰り返す形となってしまう、製膜品質などの結果に悪影響を及ぼすので、これを防ぐため、擬似的にONの状態を続けるために必要な条件として、周波数の差の逆数である周期、または、AM変調周波数の逆数である周期を、当該放電電極で発生させるプラズマ中の活性原子もしくは活性分子もしくはイオンの消滅寿命より短く、好ましくは1/2以下とすることを特徴とするものである。

【0044】請求項11は請求項1～9のいずれか1項に記載の給電方法において、周期が遅いとプラズマがON/OFFを繰り返す形となってしまう、製膜品質などの結果に悪影響を及ぼすので、これを防ぐため、擬似的にONの状態を続けるために必要な条件として、周波数の差の逆数である周期、または、AM変調周波数の逆数である周期を、シランを用いたシリコン薄膜製膜を対象として具体的に、下式(7)から求められるSiH<sub>3</sub>活性分子の寿命 $\tau$ ：

$$\tau \approx (\Delta x)^2 / (2D) \quad \dots (7)$$

ここに、Dは拡散係数で $D = 2.5 \times 10^3 \text{ (cm}^2 \text{ s}^{-1}\text{)}$ 、 $\Delta x$ は電極から基板までの距離(cm)または二水素原子ラジカルの寿命 $1.1 \times 10^{-4}$ 秒の、どちらか一方、もしくは、両方より短く、好ましくは1/2以下とすることを特徴とするものである。

【0045】請求項12は、請求項1～9のいずれか1項に記載の給電方法において、プラズマ中の活性原子もしくは活性分子もしくはイオンがプラズマ発生後のOFF時間に発生し始める応用、たとえばエッチングなどへの応用を対象として、わざと周期を遅くして故意にプラズマのOFF時間を作り、プラズマ中の活性原子もしくは活性分子もしくはイオンが発生するのに十分なOFF時間を保持し、かつ、そのプラズマ中の活性原子もしくは活性分子もしくはイオンが減少するまえに次のプラズマを発生させて再度OFFすることによって効率的に当該活性原子もしくは活性分子もしくはイオンを発生させる条件として、周波数の差の逆数である周期、または、AM変調周波数の逆数である周期を、当該放電電極で発生させるプラズマ中の活性原子もしくは活性分子もしくはイオンの発生寿命より長く、かつ10倍以下、好ましくは2倍以上4倍以下とすることを特徴とするものである。

【0046】請求項13は、請求項1～9のうち何れか1記載の給電方法において、周波数の差の逆数である周期、またはAM変調周波数の逆数である周期を、1秒以下、好ましくは1ミリ秒以下とすることにより、パーティクルの低減を図ることを特徴とするものである。

【0047】請求項14は、請求項1～9のうち何れか1記載の給電方法において、周波数の差の逆数である周期、またはAM変調周波数の逆数である周期を、下式

(8) から計算される原料ガスの放電領域滞在時間  $t$  よりも長く、好ましくは2倍以上とすることにより、パーティクルの低減を図ることを特徴とするものである。

$$[0048] \quad t \approx (S \cdot \Delta x) / Q \quad \dots (8)$$

ただし、 $S$  は基板面積 ( $\text{cm}^2$ )

$\Delta x$  は放電電極から基板までの距離 ( $\text{cm}$ )

$Q$  は体積流量 ( $\text{cm}^3/\text{秒}$ )

請求項15は、請求項1～14のいずれか1項に記載の給電方法において、前記の1次元的なモデル化が簡単に成り立つ1つの具体的条件として放電電極がラダー型電極であることを特徴とするものである。

[0049] 請求項16は、請求項1～14のいずれか1項に記載の給電方法において、一般的に用いられる方法として、放電電極が平行平板型電極であることを特徴とするものである。

[0050] 請求項17は、請求項1～16のいずれか1項に記載の給電方法において、基板側電極に、均一性を確保するための2周波数の1つであり、かつ、基板へのイオンの入射エネルギーを調整するための高周波電力を供給することを目的に、放電電極のうち、基板を設置する電極と、基板を設置しない電極のそれぞれに、2台またはそれ以上の高周波電源から高周波電力を供給することを特徴とするものである。

[0051] 請求項18は、請求項1～17のいずれか1項に記載の給電方法によって、プラズマを発生させることを特徴とするプラズマ発生方法である。

[0052] 請求項19は、請求項18に記載のプラズマ発生方法によって、半導体の製膜もしくはエッチングの分布均一化を図ることを特徴とする半導体製造方法または表面処理方法である。

[0053] 請求項20は、請求項1～17に記載の給電方法によってプラズマを空間的および時間的に移動させることにより、プラズマ内の活性分子の発生を高効率化することを特徴とするプラズマ発生方法である。

[0054] 請求項21は、請求項18に記載のプラズマ発生方法によって、半導体の製膜もしくはエッチングの高速化を図ることを特徴とする半導体製造方法である。

[0055] 請求項22は、請求項1～21項のいずれかに記載の給電方法、プラズマ発生方法、半導体製造方法または表面処理方法において、使用する全ての高周波の周波数が10～800MHzの範囲にあることを特徴とする給電方法、プラズマ発生方法、半導体製造方法または表面処理方法である。

[0056]

【発明の実施の形態】以下、添付の図面を参照して本発明の種々の好ましい実施の形態について説明する。

[0057] (第1の実施の形態) 図1を参照しながら本発明の第1の実施形態に係る高周波プラズマ生成装置を説明する。装置1Aは、太陽電池用Si半導体薄膜を

製膜するために用いられる高周波プラズマ生成装置であり、その反応容器2内に放電電極としてのラダー電極303およびアース電極3を備えている。反応容器2は気密につくられ、ガス供給管17および排気管18が適所にそれぞれ開口している。ガス供給管17は図示しないガス供給源に連通し、これを通して製膜用ガスが反応容器17内に導入されるようになっている。排気管18は図示しない真空ポンプの吸引側に連通している。ちなみに真空ポンプにより反応容器2の内圧は  $1 \times 10^{-5} \text{ Torr}$  程度まで真空排気することができるようになっている。

[0058] アース電極3とラダー電極303とは所定の間隔(例えば20mmの間隔)をもって対面配置されている。アース電極3は、被処理体としてのガラス基板16を保持するための機構(図示せず)を備え、基板16を加熱するためのヒータ(図示せず)を内蔵している。アース電極3は、被処理基板16が2.0m×2.0m角サイズである場合は2.1m×2.1m角サイズとし、接地されている。なお、ガス供給管17のガス吹き出し口は、ラダー電極303よりも後方にて開口していることが望ましく、複数の箇所からガスが並行に供給されることが好ましい。

[0059] ラダー電極303は、平行な複数本の縦方向電極棒304と一対の横方向電極棒305とを格子状に組み立ててなるものであり、アース電極3により保持される基板16と平行に対面配置されている。

[0060] ラダー電極303には4つの給電点9a、9b<sub>1</sub>が設けられている。このうち2つの第1の給電点9aは一方の横方向電極棒305に設けられ、2つの第2の給電点9b<sub>1</sub>は他方の横方向電極棒305に設けられている。なお、各給電点9a、9b<sub>1</sub>は横方向電極棒305をほぼ三等分するところにそれぞれ位置している。

[0061] 2つの第1の給電点9aには分岐する同軸ケーブル8aを介して整合器7a、パワーメータ6a、第1の高周波電源5aがこの順に接続されている。第1の高周波電源5aは周波数60.0MHzの高周波(VHF)を発振する高周波発振器を内蔵しており、2つの第1の給電点9aを介してラダー電極303に周波数60.0MHzの高周波(VHF)パワーが供給されるようになっている。なお、整合器7aから電極側の同軸ケーブル8aは、T分岐プラグを用いて分岐した。

[0062] 一方、第2の給電点9b<sub>1</sub>には分岐する同軸ケーブル8bを介して整合器7b、パワーメータ6b、第2の高周波電源5bがこの順に接続されている。第2の高周波電源5bは、第1高周波電源5aから独立しており、周波数60.3MHzの高周波(VHF)を発振する高周波発振器を内蔵しており、2つの第2の給電点9b<sub>1</sub>を介してラダー電極303に周波数60.3MHzの高周波(VHF)パワーが供給されるよう

になっている。なお、整合器7bから電極側の同軸ケーブル8bは、T分岐プラグを用いて分岐した。

【0063】このように対向する給電点9a、9b<sub>1</sub>を介して互いに異なる周波数の高周波(VHF)をラダー電極303に供給する際に、2つの高周波(VHF)間の周波数の差(本実施例では0.3MHz)が重要である。その効果については後述する。

【0064】本実施例では、ラダー電極303の対向する2本の横方向電極棒305上のそれぞれに、電極全体の中心を中点とする対称的な位置に給電点9a、9b<sub>1</sub>を配置することによって、縦方向電極棒304のそれぞれに1次元的な電圧分布が生じるようにした。これにより後述する定在波を高速で移動させるという現象が見られ、それぞれの縦方向電極棒304上の縦方向のプラズマ生成分布が均一になるとともに、それぞれの縦方向電極棒304相互間のプラズマ生成分布(横方向のプラズマ分布)も均一にすることができた。

【0065】なお、後者の横方向のプラズマ生成分布については、給電点数を上下各2点(総数4点)から、さらに上下各4点(総数8点)、上下各8点(総数16点)と増加させていくことにより、さらにプラズマ生成分布の均一化を図ることができる。

【0066】また、本実施例では2つの電源5a、5bから上下2点ずつの給電点からそれぞれ給電しているが、電源数を増やすことによりさらにプラズマ生成分布の均一化を図ることができる。例えば、4つの電源から4つの給電点の各々に異なる周波数の高周波(VHF)パワーをそれぞれ供給することにより、さらにプラズマ生成分布の均一性を向上させることが可能である。

【0067】図2は、横軸にラダー電極上の位置(任意値)をとり、縦軸に発光強度(任意値)をとって、本実施例の装置1Aを用いて生成したプラズマの発光強度をCCDカメラにより測定した結果を示す特性線図である。図中にて基板のサイズの内側で3カ所低い値がでているところは装置の構造上から縦方向電極棒の影になってプラズマが見えない箇所にあたり、実際の発光強度分布とは無関係である。この図から明らかなように、装置1Aを用いた高周波プラズマの生成では2m×2m角という非常に大きな領域範囲で、発光分布すなわちプラズマ分布の均一性±7%(最高値127/最小値11)を達成できることが判明した。

【0068】これは、高周波電源1と高周波電源2の周波数差0.3MHzすなわち300kHzによる「ビート」により、電極上に定在波が立たないようにすることができたためと考えられる。もしくは、定在波を1秒間に30万波長分、高速で移動させることができたと解釈することもできる。すなわち、非常に短い瞬間で見ると定在波分布が生じているが、これが高速で移動しているために、時間平均で見ると均一な分布となっていると考えられる。

【0069】一方、この周波数差が大きいほど定在波を移動させる速度は速くなるはずであるが、高周波元来の特性を生かした製膜速度や製膜品質を得るためには、製膜速度や製膜品質を得るために必要な高周波の周波数から20%以上異なる周波数を用いることは好ましくない。また、高周波電力の電源への入射防止に用いる整合器が機能するためには、周波数の差は1%以内であることがさらに好ましい。本実施例では周波数の差が0.5%程度であることから、後述するように、製膜速度品質も良く、かつ電源への高周波の入射も100W程度の低い値に抑えることができた。

【0070】次に、a-Si製膜や微結晶Si製膜を以下の手順で行った。

【0071】まず、例えば200℃に設定した基板ヒータ3上にSi薄膜を製膜する2m×2m角サイズの基板16を載置した。ガス供給管17からSiH<sub>4</sub>ガスをたとえば流速2000sccmで導入し、さらに微結晶Si製膜の場合には、SiH<sub>4</sub>ガスに加えて水素ガスをたとえば5000sccm程度流した。真空排気管に接続した図示しない真空ポンプ系の排気速度を調整することで反応容器1内の圧力を例えば200mTorrに調節した。

【0072】高周波電力が効率良くプラズマに供給されるように第1及び第2の整合器7a、7bをそれぞれ調整しつつ、第1高周波電源5aからは周波数60.0MHzの高周波(VHF)電力を供給するとともに、第2高周波電源5bからは周波数60.3MHzの高周波(VHF)電力を供給し、両電源5a、5bからのパワーを合計すると例えば3000Wとなるように高周波(VHF)電力を供給し、基板16とラダー電極303との間にプラズマを生成させた。プラズマ中ではSiH<sub>4</sub>が分解し、基板表面にa-Si膜や微結晶Si膜が製膜された。例えば10分間程度この状態で製膜を行うことにより必要な厚さの膜が製膜された。製膜されたサンプルの膜厚分布を測定し、給電点位置を微調整し、最適な分布が得られるようにした。製膜速度はたとえば微結晶製膜において1.0nm/秒という高速が得られ、均一性は±10%であり、太陽電池用Si薄膜半導体で必要とされる均一性を達成した。

【0073】さらに、できた膜の膜質を測定したところ、例えばラマンピーク比が9:1を越えるなど高品質で、その他、屈折率、分光特性、欠陥密度なども同様に、5cm×5cm程度の小サンプルで同じ60MHzを用いて製膜した場合とほとんど変らなかった。

【0074】これは、定在波の高速な移動によって生じるプラズマのON/OFFが、十分速く、すなわち、周波数差が300kHzであることから、1秒間に30万回×2回ON/OFFが繰り返されるため、一回のOFF時間は $2 \times 10^{-5}$ 秒以下となり、SiH<sub>4</sub>活性分子の消滅寿命( $\tau = (2 \text{ cm})^2 / (2 \times 2.5 \times 1$



$0^3 \text{ (cm}^3/\text{秒)}) = 8 \times 10^{-4} \text{ (秒)}$  よりも十分に短く、かつ、水素原子ラジカルの消滅寿命  $1.1 \times 10^{-4} \text{ (秒)}$  よりも十分短いので、製膜現象においてプラズマの ON/OFF を実質的に無視できるようになるためと考えられる。

【0075】また、本実施例で得られた更にもう一つの効果は、製膜の際に発生するパーティクルが非常に少ないことである。これは、先行文献（渡辺征夫、白石正治、「高周波変調放電によるシランガス分解」、放電研究 No.138、P27-36、1992）に記載されているように、ON 時間が 1 秒以下になるとパーティクルの成長が抑制され、好ましくは ON/OFF 周波数が 1 kHz 以上すなわち ON 時間が 1 ミリ秒以下になると実質的にほとんどパーティクルが発生しないことに起因しているものと考えられる。すなわち、本発明方法では ON 時間を  $2 \times 10^{-6}$  秒以下としていることからパーティクルがほとんど発生しない状態にあると推察することができる。

【0076】なお、詳しい説明と図示は省略するが、逆に OFF 時間を長くしてパーティクルの排出に十分に時間をかけてパーティクルを排出し、その増加を防止することもできる。すなわち、基板面積  $S$  が  $200 \times 200 \text{ cm}^2$ 、放電電極から基板までの距離  $\Delta x$  が 2 cm、体積流量  $Q$  が  $4 \times 10^3 \text{ cm}^3/\text{秒}$  の処理条件の場合に、これらの数値を下式（8）に代入して原料ガスの放電領域滞在時間  $t$  は 0.2 秒となる。よって、OFF 時間を該時間  $t$  より長い時間、すなわち 0.2 秒以上に、好ましくは 2 倍の 0.4 秒以上にすることによって、プラズマ生成領域からパーティクルを排出し、反応容器内でのパーティクルの増加が抑制されることも確認できた。

$$t \approx (S \cdot \Delta x) / Q \quad \dots (8)$$

なお、本実施例では電極にラダー電極を用いた場合を示したが、その代わりにラダー電極の一種である特開平 11-111622 号公報に報告されている網目状の電極を用いた場合、給電点位置の最適化に手間を要したが、やはり均一性 10% を得ることができた。さらに、平行平板電極を用いた場合にも、給電点の最適化の試行錯誤にさらに手間取ったが、均一性 12% を得ることができ、ラダー電極のような複雑な電極を用いずにそこそこの均一性が得られた。

【0078】また、本実施例では 60 MHz 付近の周波数の場合を示したが、20 MHz 付近や 200 MHz 付近でも同様の効果があることを確認した。

【0079】（第 2 の実施の形態）図 3 を参照しながら本発明の第 2 の実施形態に係る装置について説明する。図 3 は、図 1 に示した第 1 実施形態の装置 1 A の高周波（VHF）給電回路に変更を加えた第 2 の実施形態に係る装置 1 B の給電回路を示す図である。この給電回路の変更により本実施形態の装置 1 B では上記第 1 実施形態の装置 1 A よりも運転条件範囲を拡大することができるという利点がある。本実施例でも  $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$  角サイズ

の基板への高周波による均一製膜をおこなうのに用いたもので、電源系以外の反応容器内などの構成は第 1 の実施の形態と同様であるので、両者が共通する点の説明は省略する。

【0080】本実施形態の装置 1 B が第 1 実施形態の装置 1 A と異なる点は、次の①～⑤の 5 点である。

【0081】①高周波電源の発振周波数について、上記第 1 実施形態の装置 1 A ではそれぞれの高周波電源 5 a, 5 b に内蔵される水晶発振器が不確かなことを利用して異なる 2 つの周波数を発生させていた。これに対して本実施形態の装置 1 B では、2 波信号発生器 20 により周波数差を一定値に制御することになっている。前者（装置 1 A）では、周波数差を任意に選ぶことができず、したがって、例えば周波数差が 10 Hz しかない 2 つの組合せになってしまった場合に、定在波は 10 Hz でしか移動せず、プラズマがその周期で ON/OFF してしまい、製膜に悪影響を与えてしまう。また、発振周波数差が時間的に安定せず、その結果、再現性が低くなるおそれがある。これに対して後者（装置 1 B）では最適な周波数差に固定して運転することができる。

【0082】②第 1 実施形態の装置 1 A では、それぞれの高周波電源 5 a, 5 b の保護回路（図示せず）も独立であった。これに対して本実施形態の装置 1 B では 1 つの保護回路 22 のみを有し、それぞれの電源 5 a, 5 b への入射電力をパワーメータ 6 a<sub>1</sub>, 6 b<sub>2</sub> で測定し、その大きさのいずれか一方が制限値を越えると、両方の電源の出力を制限するようにした。前者（装置 1 A）の場合、例えば第 1 電源 5 a への入射電力（反射電力と、第 2 電源 5 b からの入射電力の和）が、何らかの原因で第 1 電源 5 a の許容量を超えて大きくなってしまった場合に、第 1 電源 5 a の保護回路は第 1 電源 5 a の出力を抑える働きをするが、第 2 電源 5 b からの過剰な入射はまったく抑えられずそのままの状態であるので、最悪の場合には第 1 電源 5 a が損傷を受けることがある。

【0083】これに対して後者（装置 1 B）に同じ事象が起これば、第 1 電源 5 a への過剰入力により保護回路 22 が働いて、第 1 及び第 2 電源 5 a, 5 b とともに出力が抑えられ、第 1 電源 5 a への入射電力は抑えられるので、第 1 電源 5 a が損傷することはない。入射電力が抑えられた状態で整合器 7 b の調整などを行うことにより、第 2 電源 5 b からの過剰入力の原因を取り除けば、再び両電源 5 a, 5 b の出力をあげることができ、所望の電力を供給することができる。

【0084】なお、本実施形態ではアイソレータ 24 a, 24 b を第 1 及び第 2 の給電回路にそれぞれ挿入し、通常は過電力が電源 5 a, 5 b に入射しないようにしているので、とくに保護回路は必要ない。しかし、反射電力がアイソレータ 24 a, 24 b の許容電力を越えてしまい、アイソレータ 24 a, 24 b が作動しなくなってしまうような場合に、この保護回路 22 による保

護動作が必要になる。③第1実施形態の装置1 Aでは、第1電源5 aに入射する電力(反射電力と、第2電源5 bからの入射電力の和)を抑制する手段は整合器7 aのみであった。これに対して本実施形態の装置1 Bではサーキュレータと負荷からなるアイソレータ2 4 a、2 4 bを挿入することにより、電極3 0 3側から電源5 a、5 bに入射する電力を無くす構成にしている。

【0085】前者(装置1 A)では、第1電源5 aの出力が電極3 0 3から反射されてくる電力は整合器7 aで完全にゼロにできたとしても、他の電源すなわち第2電源5 bから電極3 0 3と整合器7 aを通して第1電源5 aに入射してくる電力は、位相や周波数が異なるため、同時にゼロにすることはできない。したがって、この電力が大きい場合(プラズマの発生状態などによって電極3 0 3を抜けてくる電力は、大きくなったり小さくなったり変動する)、第1電源5 aに大きな電力が入射してしまい、第1電源5 aの状態を不安定にし、最悪の場合は過剰入力により第1電源5 aが壊れてしまう可能性もある。特に、プラズマが生成する前のプラズマ負荷がない場合に、このような状況になりやすい。

【0086】これに対して後者(装置1 B)の給電回路にはアイソレータ2 4 a、2 4 bを挿入しているので、電源5 a、5 bへの入射を負荷で全て吸収することができ、過剰入力による電源5 a、5 bの破壊が防止される。

【0087】なお、アイソレータ2 4 a、2 4 bを使用する場合、特に本実施例のようなキロワット級の高周波電力を定格値とするアイソレータの周波数帯域幅は非常に狭い。すなわち、高周波電力1 kW以下における周波数帯域幅は使用周波数の4 %程度であり、高周波電力2 kW程度におけるそれは1 %程度であることから、第1電源5 aと第2電源5 bとの周波数の差をこれらの値に抑える必要がある。本実施形態では第1電源5 aの発振周波数を60.2 MHzに設定し、第2電源5 bの発振周波数を59.8 MHzに設定したので、両電源5 a、5 bの発振周波数の差を、2 kW定格の場合の周波数帯域幅1 %に相当する0.6 MHz以内におさめた。

【0088】④第1実施形態の装置1 Aでは、一系統にパワーメータ6 a、6 bを1台ずつ(合計2台)設けたが、これに対して本実施形態の装置1 Bでは、一系統に2台ずつパワーメータ6 a<sub>1</sub>、6 a<sub>2</sub>、6 b<sub>1</sub>、6 b<sub>2</sub>を設けた(合計4台)。給電回路にアイソレータ2 4 a、2 4 bを挿入したので、通常はどんな整合状態にあっても電源5 a、5 bへの入射電力すなわちパワーメータ6 a<sub>1</sub>、6 a<sub>2</sub>における反射電力はゼロである。そこで、整合状態を最適化するためにアイソレータ2 4 a、2 4 bよりも整合器側にパワーメータ6 a<sub>1</sub>、6 b<sub>1</sub>を設置し、整合器7 a、7 bからの戻り電力も測定する必要があるからである。

【0089】⑤第1実施形態の装置1 Aでは、整合器7

a、7 bより電極側で同軸ケーブル8 a、8 bを分岐するためにT分岐プラグを用いたが、これに対して本実施形態の装置1 Bでは、プラズマ負荷の不均等や、時間変化などであっても安定な電力分配が行われるように、分配器2 6 a、2 6 bを使用した。

【0090】以上の改善により、入力パワー合計4 kWを入力し、製膜速度はたとえば微結晶製膜において1.5 nm/秒という高速が得られた。また、膜厚均一性は±10%であった。これは、太陽電池用Si薄膜半導体で必要とされる膜厚均一性をクリアしている。

【0091】(第3の実施の形態)図4を参照しながら本発明の第3の実施形態に係る装置について説明する。図4は、図3に示した第2実施形態の装置1 Bの高高周波(VHF)給電回路に変更を加えた第3の実施形態に係る装置1 Cの給電回路を示す図である。

【0092】装置1 Cは、独立の2つ電源5 a、5 bと、発振器20と、位相検出器30 a、30 bと、位相シフト器33と、ファンクションジェネレータ34とを備えている。2つ電源5 a、5 bは、同じ周波数60 MHzの高高周波(VHF)パワーを電極3 0 3にそれぞれ独立に給電するようになっている。位相シフト器33は、発振器20と第2電源5 bとの間に挿入され、第2電源5 bから給電される高周波の位相をシフトさせるようになっている。これにより第2電源5 bから電極3 0 3に給電される高周波は第1電源5 aから電極3 0 3に給電される高周波と同期しなくなり、両電源5 a、5 bからの給電パワーがシフトされる。ファンクションジェネレータ34は、任意の波形信号を位相シフト器33に発信し、位相差の時間変化を制御するためのものである。

【0093】発振器20から周波数60 MHzの高高周波(VHF)を発振させると、その一系統はそのまま第1電源5 aで増幅され、パワーメータ6 a<sub>1</sub>、アイソレータ2 4 a、パワーメータ6 a<sub>2</sub>、整合器7 aを介して第1位相検出器30 aに送り、位相検出器30 aで位相検出を行ってから、分配器2 6 aを介して電極3 0 3に供給される。

【0094】発振高周波(VHF)の他の一系統は、位相シフト器33で位相をシフトされ、後は同様に第2電源5 b、パワーメータ6 b<sub>1</sub>、アイソレータ2 4 b、パワーメータ6 b<sub>2</sub>、整合器7 bを介して第2位相検出器30 bに送り、位相検出器30 bで位相検出を行ってから、分配器2 6 bを介して電極3 0 3に供給される。この場合に、位相シフト器33で系統aと系統bとの位相差が時間的に変化するように、ファンクションジェネレータ34が制御する。すなわち位相差の時間変化はファンクションジェネレータ34によって発生させた任意波形信号を位相シフト器33に入力して制御した。位相差は、各分配器30 a、30 bの直前において各系統a、bの位相を位相検出器2 6 a、2 6 bにより検出

し、検出位相信号を位相シフト器33に送り、フィードバック制御した。

【0095】この実施形態において、一定の位相差に固定して運転すれば定在波が起こってプラズマが不均一になってしまうのに対し、位相差を時間的に変化させることにより、定在波を移動させることができ、製膜時間内の時間平均により均一なプラズマ発生及び製膜膜厚分布を得ることができる。そして、本第3実施形態で使用しているアイソレータ24a、24bと保護回路22は、上記第2の実施形態の装置1Bの場合と同様に電源5a、5bを作動させる際に、電源5a、5bの安定化に寄与する。

【0096】この際、位相差をあまり高速で変調すると、高周波の周波数帯域が広がり、アイソレータ24a、24bの周波数帯域幅を超えてしまい、アイソレータ24a、24bが損傷するなどの可能性がある。そこで、スペクトラムアナライザ（図示せず）を位相検出部30a、30bに接続し、帯域幅を定格である周波数の1%以内になる範囲で変調速度を決定した。

【0097】本実施例ではファンクションジェネレータ34からの位相制御信号の周波数を10kHzとして変調したところ、帯域幅は1%を越えなかった。

【0098】（第4の実施の形態）図5を参照しながら本発明の第4の実施形態に係る装置について説明する。図5は、図1に示した装置1Aの高周波（VHF）給電回路に変更を加えた第4の実施形態に係る装置1Dの給電回路を示す図である。

【0099】装置1Dは、独立の2つ電源5a、5bと、独立の2つのパワーメータ6a、6bと、ミキサー40と、整合器7と、分配器26とを備えている。本第4実施形態では、まず2台の独立した高周波電源5a、5bからそれぞれ異なる周波数の高周波（VHF）電力を出力する。この高周波電力をミキサー40で混合し、整合器7および分配器26を介してラダー電極303に供給した。

【0100】本実施形態は、 $\pm 10\%$ 以内の膜厚均一性を得ることができ、単純な給電回路で所期の目的を達することができた。ちなみに本実施形態では、給電点配置の最適化の試行錯誤に手間取り、またミキサー40の定格により電力の最大値を2kWに制限された。

【0101】（第5の実施の形態）図6を参照しながら本発明の第5の実施形態に係る装置について説明する。図6は、図1に示した第1実施形態の装置1Aの高周波（VHF）給電回路に変更を加えた第5の実施形態に係る装置1Eの給電回路を示す図である。

【0102】装置1Eは、AM変調発振器50と、高周波電源5と、パワーメータ6と、整合器7と、分配器26とを備えている。高周波電源5の高周波を、AM変調発振器50で増幅して得ることにより、キャリア周波数60MHz、変調周波数30MHzのAM変調高周波と

した。これを、パワーメータ6、整合器7、分配器26を介してラダー電極303に給電した。

【0103】本実施形態によれば、簡易な回路で比較的均一な $\pm 15\%$ の膜厚分布を得ることができた。

【0104】（第6の実施の形態）S. Samukawa, "Role of Negative Ions in High-Performance Etching Using Pulse-Time-Modulated Plasma", Extended Abstract of 4th International Conference on Reactive Plasmas, SR 1.04, pp. 415, 1998.にあるように、ハロゲン系のガス、例えば、塩素系のガスを用いてプラズマを発生させ、塩素負イオン( $\text{Cl}^-$ )を発生させて半導体のエッチングに用いる場合、従来は、高周波電源から発生する電力をON/OFFすることにより、プラズマを発生、消滅させプラズマが消滅する際に電子付着効果により大量に塩素負イオンが発生することと、基板表面に生じる壁電荷が消滅する効果を用いてエッチングの高速化、高品質化を図っている。本実施例ではこの効果を定在波を移動することによって生じさせることを狙っている。図3に示した第2の実施形態の装置1Bを用いて、2つの異なる周波数の差を4kHzとし、ハロゲン系のガス、例えば、塩素系のガスを用いてプラズマを発生させ、塩素負イオン( $\text{Cl}^-$ )を発生させ、半導体のエッチングを行った。この時、定在波の膜の部分ではプラズマがONの状態、節の部分ではプラズマがOFFの状態になるので定在波を高速で移動させることにより高効率で大量にかつ簡単に塩素負イオンを発生させエッチングを高速で行うことができる。

【0105】定在波を移動させる速度、すなわち、位相の変化周期は、前記参考論文に示されている塩素負イオンの発生時間約100 $\mu$ 秒より長く、2倍以上4倍以下になるように、250 $\mu$ 秒程度とした。このとき、プラズマOFFの時間が125 $\mu$ 秒程度となり、十分な負イオン発生が得られる。これは周波数の差を4kHzにすることにより実現できる。

【0106】さらに、高周波の周波数に60MHzを用いることによって従来法で用いられる13.56MHzとくらべてプラズマ密度が高くなると同時にプラズマシース厚さが薄くなることにより、プラズマ中で発生する大量の塩素負イオンが効率的に基板面に流入し、エッチング速度がさらに速くなる効果が得られる。これらの結果、従来の13.56MHz単一周波数を用いた場合の4倍程度のエッチング速度が得られた。本実施形態は、シリコン薄膜などの製膜に用いる反応容器のプラズマによる洗浄、いわゆるセルフクリーニングなどの表面処理方法にも応用することができる。

【0107】（第7の実施の形態）図7を参照しながら本発明の第7の実施形態に係る装置について説明する。図7は、図1に示した装置1Aの給電点および高周波周波数に変更を加えた第7の実施形態に係る装置1Fの給電回路を示す図である。

【0108】装置1Fは、周波数60.00MHzの高周波を供給する第1電源5aと、周波数13.56MHzの高周波を供給する第2電源5bと、アース電極3に取り付けられた2つの給電点9b<sub>1</sub>、9b<sub>2</sub>とを備えている。

【0109】本実施形態をハロゲン系ガスNF<sub>3</sub>によるシリコン膜のエッチングに適用したところ、60MHzの高周波による高密度性と、13.56MHzによる基板バイアス効果、さらに、両者の周波数の差による定在波の抑制効果により、1m×1mの面積に均一に、かつ高速なエッチング速度(10nm/秒程度)が得られた。

【0110】本実施形態は、シリコン薄膜などの製膜に用いる反応容器のプラズマによる洗浄、いわゆるセルフクリーニングなどの表面処理方法にも応用することができる。

【0111】なお、上記1～7の実施形態では主に4点給電方式の例について説明したが、本発明はこれのみに限られることなく、2点給電方式、6点給電方式、8点給電方式、10点給電方式、12点給電方式など他の多

点給電方式にも適用することができる。

【0112】  
【発明の効果】本発明によれば、大面積の製膜およびエッチング処理等に高周波(VHF)を用いて1m×1mをも越えるような非常に大きな基板や表面に対し、均一な処理を行うことができる。プラズマCVD製膜等においては高周波であるにも拘わらず広範囲にわたリプラズマ密度を均一化できる高周波プラズマ生成方法、半導体製造方法および表面処理方法が提供される。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の第1の実施形態に係る放電電極への給電方法に用いた装置の高周波電源回路および反応容器を示す構成ブロック図。

【図2】第1の実施形態により得られた2m×2mサイズ基板の処理を目的としたプラズマ発光強度分布の均一性を測定した結果を示す特性線図。

【図3】本発明の第2の実施形態に係る放電電極への給電方法に用いた装置の高周波電源回路を示す構成ブロック図。

【図4】本発明の第3の実施形態に係る放電電極への給電方法に用いた装置の高周波電源回路を示す構成ブロック図。

【図5】本発明の第4の実施形態に係る放電電極への給電方法に用いた装置の高周波電源回路を示す構成ブロック図。

【図6】本発明の第5の実施形態に係る放電電極への給

電方法に用いた装置の高周波電源回路を示す構成ブロック図。

【図7】本発明の第7の実施形態に係る放電電極への給電方法に用いた装置の高周波電源回路を示す構成ブロック図。

【図8】従来の平行平板電極の裏側中央の1点に給電する方式のPCVD装置を示す断面ブロック図。

【図9】従来のラダー電極の4点に給電する方式のPCVD装置を示す断面ブロック図。

【図10】図9の従来装置を別の方向から見た図。

【図11】100MHzで電極の1点に給電したときの電圧分布およびイオン飽和電流分布をそれぞれ示す特性線図。

【図12】60MHzおよび100MHzでラダー電極に4点給電したときの電圧分布を示す特性線図。

【図13】100MHzで平行平板電極の一端をリアクタンスで終端したときの電圧分布を示す特性線図。

【符号の説明】

1A, 1B, 1C, 1D, 1E, 1F…プラズマCVD装置、

2…反応容器、

3…アース電極(基板ヒータ)、

5a, 5b…高周波電源、

6a, 6a<sub>1</sub>, 6a<sub>2</sub>, 6b, 6b<sub>1</sub>, 6b<sub>2</sub>…パワーメータ、

7a, 7b…整合器、

8a, 8b…同軸ケーブル、

9, 9a, 9b<sub>1</sub>, 9b<sub>2</sub>…給電点、

16…基板、

17…ガス供給管、

18…排気管、

20…発信器、

22…保護回路、

24a, 24b…アイソレータ、

26, 26a, 26b…分配器、

30a, 30b…位相検出器、

33…位相シフト器、

34…ファンクションジェネレータ、

40…ミキサー、

50…AM変調発振器、

100…平行平板電極型プラズマCVD装置、

110…ラダー電極型プラズマCVD装置、

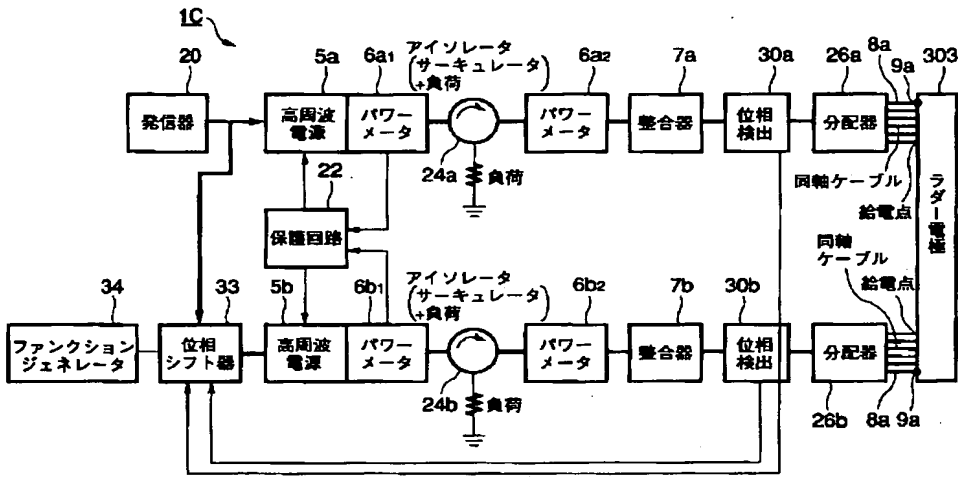
303…ラダー電極、

304…縦方向電極棒、

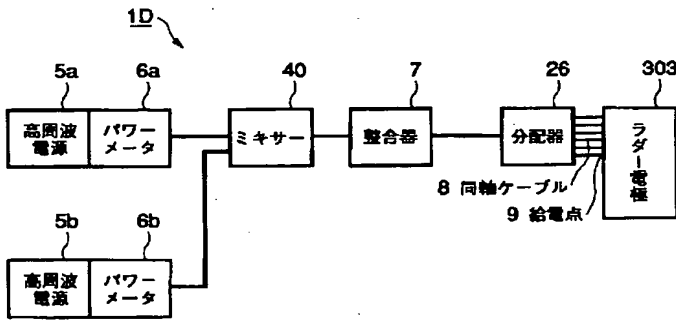
305…横方向電極棒。

Figure 1 is a schematic diagram of a plasma processing apparatus. The diagram shows a cross-section of a cylindrical reactor. At the center is a vertical electrode assembly (3) consisting of a base plate (16) and a gas supply pipe (17). Surrounding this is a vertical electrode (303) and a vertical electrode rod (304). The reactor is connected to a power supply system (7a, 6a, 5a) and a gas supply system (7b, 6b, 5b). The power supply system includes a high-frequency power source (5a), a power meter (6a), and a matching unit (7a). The gas supply system includes a high-frequency power source (5b), a power meter (6b), and a matching unit (7b). The reactor is also connected to a vacuum pump (18).

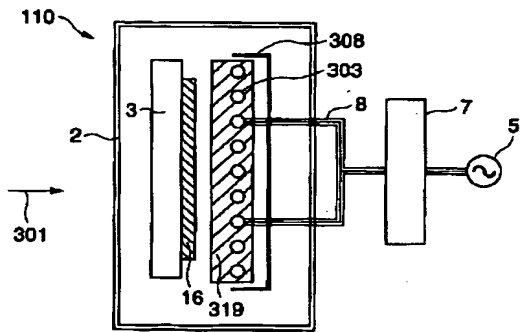
【図 4】



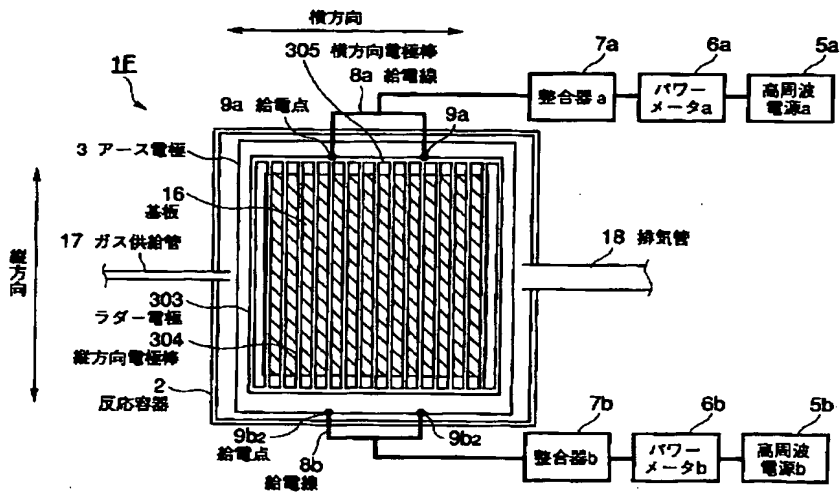
【図5】



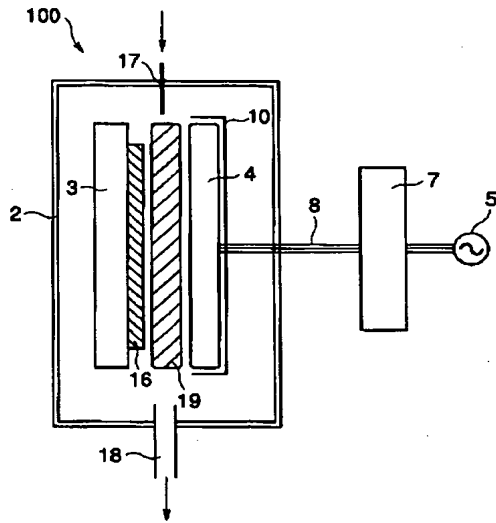
【図9】



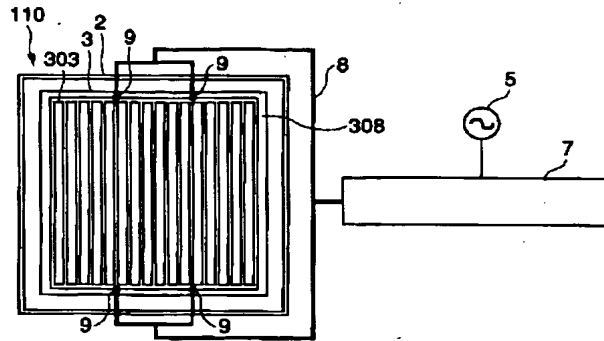
【圖 7】



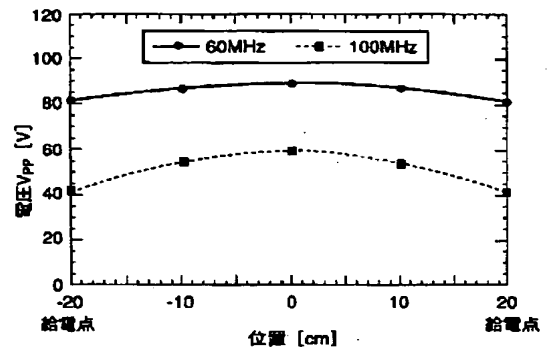
【図8】



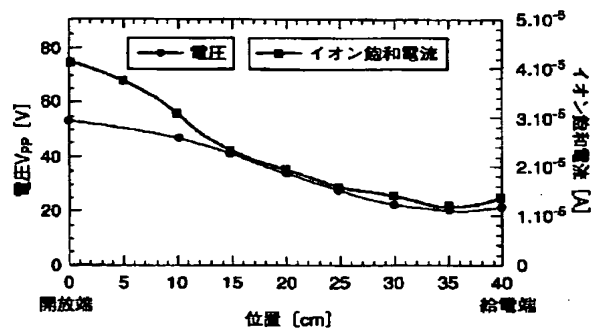
【図10】



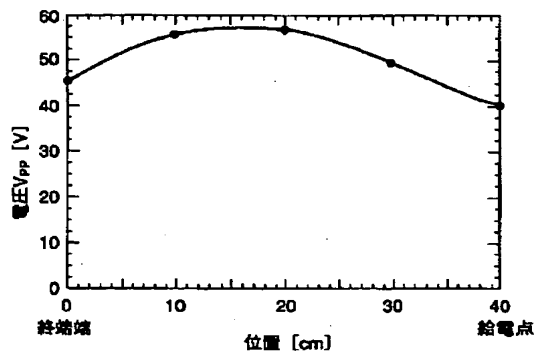
【図12】



【図11】



【図13】



## フロントページの続き

(72)発明者 竹内 良昭  
長崎県長崎市深堀町五丁目717番1号 三  
菱重工業株式会社長崎研究所内

(72)発明者 真島 浩  
長崎県長崎市深堀町五丁目717番1号 三  
菱重工業株式会社長崎研究所内

(72)発明者 青井 辰史  
長崎県長崎市飽の浦町1番1号 三菱重工  
業株式会社長崎造船所内

(72)発明者 村田 正義  
長崎県長崎市深堀町五丁目717番地1 長  
菱エンジニアリング株式会社内

Fターム(参考) 4K030 AA06 AA17 BA30 CA12 DA03  
DA04 FA01 FA03 JA03 JA11  
JA18 KA15 KA17 KA18 KA30  
KA41  
5F004 AA01 BA06 BB11 BB13 CA03  
5F045 AA08 AB03 AB04 AB33 BB02  
BB15 CA13 EH04 EH13 EH19  
GB15